РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2018, том 5, выпуск 3, с. 52–59

— РАДИОТЕХНИКА И КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ —

УДК 621.396.677:621.396.678 DOI 10.30894/issn2409-0239.2018.5.3.52.59

#### Антенные структуры с подавлением многолучевости

**О. А. Курдюмов**, к. ф.-м. н., mail.orkkniikp@inkosp.ru Филиал ОАО «ОРКК»-«НИИ КП», Москва, Российская Федерация

**О. Е. Лопатко**, к. т. н., mail.orkkniikp@inkosp.ru Филиал ОАО «ОРКК»-«НИИ КП», Москва, Российская Федерация

**B. E. Cara**, mail.orkkniikp@inkosp.ru

Филиал ОАО «ОРКК»-«НИИ КП», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье описан способ подавления многолучевости за счет диаграммных свойств антенн. Формирование диаграмм направленности осуществляется путем интерференции полей, возбуждаемых основной антенной и дополнительной — «антиантенной».

Проведен анализ требований к диаграмме направленности антенны с подавлением многолучевости. Показано, что антенны наземного базирования должны подавлять сигналы левой поляризации, приходящие на дополнительных углах, то есть углах 180° –  $\theta$ , где  $\theta$  — угол падения основного сигнала. Проанализировано, насколько зарубежные антенны высокоточного позиционирования удовлетворяют этим требованиям.

У авторов имелась возможность измерить характеристики трех антенн: NovAtel 702, Trimble Geodetic Zephyr 2, Javad. Показано, что эти антенны удовлетворяют требованиям подавления многолучевости на зенитных углах  $\theta = 0-40^{\circ}$ .

Описана конструкция антенны диапазона частот L1, которая полностью удовлетворяет указанным требованиям. Она состоит из микрополосковой антенны с четырехточечным возбуждением на подложке из диэлектрика с  $\varepsilon = 9.6$ , вокруг которой помещена антиантенна — антенна вытекающей волны также с четырехточечным возбуждением. Приведена схема питания этой антенны и ее фотография.

Показаны диаграммы направленности макета антенны, из которых видно, что сигналы левой поляризации не превышают уровня минус 25 дБи. Это обеспечивает выполнение указанных выше требований подавления многолучевости.

Ключевые слова: многолучевость, диаграмма направленности, антиантенна, дополнительные углы

### Antenna Structure with Multipath Effect Suppression

**O.A. Kurdyumov**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), mail.orkkniikp@inkosp.ru

A branch of JSC "United Rocket and Space Corporation"–"Institute of Space Device Engineering",

Moscow, Russian Federation

**O.E. Lopatko**, Cand. Sci. (Engineering), mail.orkkniikp@inkosp.ru

A branch of JSC "United Rocket and Space Corporation"-"Institute of Space Device Engineering",

Moscow, Russian Federation

V. E. Sagach, mail.orkkniikp@inkosp.ru

A branch of JSC "United Rocket and Space Corporation"-"Institute of Space Device Engineering",

Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The article describes a method for suppressing the multipath effect caused by the diagram properties of antennas. The formation of radiation patterns is carried out by interference of fields excited by the main antenna and an additional antenna, the anti-antenna.

An analysis of the requirements for the antenna pattern with multipath suppression is carried out. It is shown that ground based antennas should suppress signals of left polarization coming at complimentary angles, i.e. angles of  $180^{\circ} - \theta$ , where  $\theta$  is the angle of incidence of the main signal. The compliance of the foreign antennas of high-precision positioning to these requirements is analyzed.

The authors were able to measure the characteristics of three antennas: NovAtel 702, Trimble Geodetic Zephyr 2, Javad. It is shown that these antennas meet the requirements for multipath suppression at zenith angles  $\theta = 0-40^{\circ}$ .

The design of the L1 frequency band antenna is described, which fully meets these requirements. It consists of a microstrip antenna with four-point excitation on a dielectric substrate with  $\varepsilon = 9.6$ , around which is placed an anti-antenna — the antenna of the outgoing wave is also with four-point excitation. The power circuit of this antenna and its photograph are shown.

Radiation patterns of the antenna layout are shown. It can be seen that the signals of the left polarization do not exceed minus 25 dBi. This ensures that the above multipath suppression requirements are met.

Keywords: multipath, radiation pattern, anti-antenna, complimentary angles

#### Введение

На современном этапе, когда приемные антенны широко используются в высокоточных системах позиционирования по сигналам навигационных спутников, большое значение имеют свойства антенны по подавлению явления многолучевости.

Многолучевость возникает при отражении полезных сигналов от окружающих антенну предметов. При анализе способности антенны подавлять многолучевость необходимо учитывать ее поляризационные свойства. Так, например, антенна с линейной поляризацией подавляет кросс-поляризованные излучения, а антенна с правосторонней вращающейся поляризацией подавляет левополяризованные излучения.

В диссертации Д. В. Татарникова [1] предложен способ борьбы с многолучевостью с помощью компенсатора помех (в дальнейшем для краткости называемого «антиантенной»), расположенного в отдельном этаже конструкции. «Антиантенна», взаимодействуя с основной антенной, создает «нули» диаграммы направленности (ДН) в выбранных направлениях в полосе рабочих частот.

В настоящей статье описываются «антиантенны», которые располагаются в одном этаже с основными микрополосковыми антеннами и могут подавлять отраженные сигналы.

# Конструкция «антиантенны» диапазона частот L1

Поскольку в современных приемных системах используются главным образом микрополосковые антенны (МПА), постольку здесь рассматриваются конструкции «антиантенн», совместимые с ними. Микрополосковая антенна представляет собой излучатель, расположенный на поверхности диэлектрической подложки и питаемый в одной, двух или четырех точках с помощью коаксиальных кабелей. Точки питания расположены в центральной области структуры. Поэтому конструкцию «антиантенны» желательно выбрать в виде кольцевого излучателя, охватывающего основную антенну и питаемого на его периферии. Авторами ранее была предложена реализация широкополосной антенны с многоточечным возбуждением и вытекающей волной (AMBB), которая имеет четыре точки питания, расположенные на периферии. Такая антенна может быть совмещена с основной микрополосковой антенной. Пример реализации этой структуры для диапазона частот L1 на фланце диаметром 200 мм показан на рис. 1. На рис. 2 приведены диаграммы направленности этой антенны для левой поляризации.



Рис. 1. Пример реализации структуры, состоящей из основной МПА, расположенной в центре, и кольцевой антенны АМВВ на фланце диаметром 200 мм

Комбинируя ДН левых поляризаций с определенными весовыми коэффициентами и фазами, можно получить результирующие ДН с увеличенным подавлением излучения этой поляризации в выбранной области зенитных углов. Такая комбинация позволит создать антенну с увеличенным подавлением многолучевости, которое необходимо в системах высокоточного позиционирования.

# Анализ требований к ДН антенны с подавлением многолучевости

Антенны высокоточного позиционирования по сигналам навигационных спутников должны ослаблять сигналы, отраженные от окружающих предметов [1].

Для реализации этого требования при наличии предметов, вызывающих отраженные сигналы в верхнем полупространстве, необходимо использовать антенны с высоким коэффициентом эллиптичности. Высокий коэффициент эллиптичности гарантирует подавление сигналов левой поляризации, которые появляются при отражении от местных предметов. Высокий коэффициент эллиптичности реализуется в антеннах с многоточечным



Рис. 2. ДН левых поляризаций: а) МПА; б) «антиантенны» АМВВ

возбуждением, в частности с четырехточечным квадратурным возбуждением, при котором точки питания антенны, расположенные по кругу, имеют последовательные фазы 0°, 90°, 180°, 270°. Поэтому в настоящей статье рассматриваются именно такие антенны.

Для реализации этого требования при наличии предметов, вызывающих отраженные сигналы в нижнем полупространстве, в частности от подстилающей поверхности, необходимо использовать антенны с высоким подавлением левополяризованных излучений, попадающих на антенну из нижнего полупространства. Общеизвестный способ подавления излучений из нижнего полупространства основан на использовании пространственных фильтрующих структур — чок-рингов. Обычно чок-ринги характеризуются большими габаритами (диаметр более 350 мм) и массой.

К числу известных мировых производителей высокоточной аппаратуры для гражданских применений относятся компании NovAtel (Канада) [3], Trimble (США) [4], Javad JNSS (США/РФ) [5].

Антенны серии 700, производимые фирмой NovAtel, представляют собой многозаходные спирально-щелевые полосковые антенны вытекающей волны. Возбуждение заходов осуществляется бегущей волной в полосковой линии, расположенной на обратной стороне подложки. Диаметр антенны равен 185 мм, на расстоянии 12,8 мм от излучателя расположен экран. Кроме того, для подавления многолучевости между экраном и излучателем установлен поглотитель СВЧ-излучения. Достоинствами этих антенн являются широкополосность, широкая ДН с высоким усилением на пригоризонтных углах, единый стабильный фазовый центр, совпадающий с геометрическим центром антенны. Подробный анализ работы таких антенн дан в [6]. Измерения с накоплением в течение 10 ч позволили получить СКО ошибки позиционирования в горизонтальной плоскости 2,1 мм, а в вертикальной — 1,7 мм. Использование трех антенн с базой 2 м дало следующие СКО-ошибки измерения углов: азимут — 2,1', крен — 3,3', тангаж — 2,9'.

Антенны Trimble Zephyr Geodetic 2 — это микрополосковые антенны с четырехточечным питанием и отражателем, выполненным по технологии Stealsh (увеличение поверхностного сопротивления экрана от центра к периферии). Рекламируется точность положения фазового центра в пределах  $\pm 0,5$  мм.

Антенны фирмы Javad — это микрополосковые антенны с двухточечным питанием в комбинации с чок-рингом. Рекламируется точность положения фазового центра в пределах ±1 мм.

Авторы имели возможность измерения характеристик антенн этих трех типов. Измерения проводились в безэховой камере с коэффициентом безэховости — 30 дБ. Результаты приведены в табл. 1.

Из этой таблицы видно, что существенное подавление излучения из нижней полусферы достигается только в антеннах фирмы Javad — за счет использования чок-ринга. Однако это приводит к значительным колебаниям фазового центра. Реклами-

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ т. 5 вып. 3 2018

Таблица 1. Характеристики антенн высокоточного позиционирования мировых производителей, полученные авторами на приобретенных образцах

Тип антенны	Диа- метр, м	Уровень задних лепестков по отношению к КУ в зените, дБ		Тип экрана
Диапазон ча	астот	L1 L2		
NovAtel 702	185	Минус 27	Минус 23	Экран с по- глотителем
Trimble Zephyr Geodetic 2	343	Минус 23	Минус 26	Trimble Stealsh
Javad	320	Минус 32	Минус 32	Чок-ринг

руемая стабильность фазового центра на практике подтверждается только для антенн фирмы NovAtel. Высокая стабильность положения фазового центра антенн фирм Trimble и Javad является, по-видимому, результатом высокой идентичности антенн, а также испытаниями в полевых условиях и многочасового набора статистики и постобработки.

Грубая оценка величины ошибки определения координат за счет эффекта многолучевости может быть получена следующим образом. Если максимальная ошибка определения фазы приходящей на антенну волны равна  $\Delta \varphi$ , то точность определения координаты  $\Delta r$  будет равна  $\Delta \varphi \lambda/360^{\circ}$ . Максимальная ошибка определения фазы связана с амплитудами прямого  $A_{\rm n}$  и отраженного  $A_{\rm o}$  сигналов соотношением  $\Delta \varphi \approx 57, 3A_{\rm o}/A_{\rm n}$ . Тогда  $\Delta r = 57, 3A_{\rm o}\lambda/(360^{\circ}A_{\rm n})$ .

При  $\lambda \approx 190$  мм (диапазон частот L1)  $\Delta r \approx 30 A_{\rm o}/A_{\rm n}$ . При  $\lambda \approx 240$  мм (диапазон частот L2)  $\Delta r \approx 38 A_{\rm o}/A_{\rm n}$ .

Чтобы получить  $\Delta r \approx 1$  мм, необходимо иметь  $A_{\rm o}/A_{\rm n} \approx 0.033$  (L1) и  $A_{\rm o}/A_{\rm n} \approx 0.026$  (L2). При этом нужно еще учесть, что коэффициент отражения может быть меньше единицы.

При отражении от металлических и близких к ним по свойствам поверхностей происходит инвертирование направления вращения волн с вращающейся поляризацией — с правой на левую. При этом все антенны, предназначенные для приема волн с вращающейся поляризацией, в области углов 180°-90° реагируют на волны с левой поляризацией.

Для антенн, устанавливаемых на летающие объекты (на высотах ниже орбит навигационных спутников), основную роль играют отраженные левополяризованные сигналы от предметов, расположенных выше антенн. Как уже было сказано выше, величина этих отраженных сигналов определяется коэффициентом эллиптичности антенны.

Для антенн наземного базирования, кроме этих отраженных сигналов, необходимо рассматривать сигналы, отраженные от подстилающих поверхностей, в частности от земли (почвы).

Комплексные коэффициенты отражения от почвы для горизонтальной,  $\tilde{\Gamma}_{r}$ , и вертикальной,  $\tilde{\Gamma}_{в}$ , поляризаций определяется формулами [7]:

$$\widetilde{\Gamma}_{\Gamma} = \frac{(\cos\theta - A_1)^2 + A_2^2}{(\cos\theta + A_1)^2 + A_2^2};$$
(1)

$$\widetilde{\Gamma}_{\rm \scriptscriptstyle B} = \frac{(\varepsilon \cos \theta - A_1)^2 + (\varepsilon \cos \theta \operatorname{tg} \delta - A_2)^2}{(\varepsilon \cos \theta + A_1)^2 + (\varepsilon \cos \theta \operatorname{tg} \delta + A_2)^2}, \qquad (2)$$

где

$$A_1 = A\cos F, \quad A_2 = A\sin F; \tag{3}$$

$$\mathbf{A} = ((\varepsilon - \sin^2 \theta)^2 + \varepsilon^2 \operatorname{tg}^2 \delta)^{0,25};$$
(4)

$$F = 0.5 \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon \operatorname{tg} \delta}{\varepsilon^2 - \sin^2 \theta}.$$
 (5)

На рис. З приведены зенитные зависимости модулей этих коэффициентов для случаев сухой ( $\varepsilon = 4$ , tg  $\delta = 0,1$ ) и влажной ( $\varepsilon = 10$ , tg  $\delta = 0,5$ ) почвы.

Нужно учесть, что при отражении от земли происходит преобразование правосторонней поляризации в левостороннюю. Если амплитуду падающей волны представить в виде [8]

$$A_{\Pi} = A_{\Gamma} + jA_{B}, \tag{6}$$

то амплитуда отраженной волны будет равна:

$$A_{\rm o} = \widetilde{\Gamma}_{\rm \Gamma} A_{\rm \Gamma} + j \widetilde{\Gamma}_{\rm B} A_{\rm B}. \tag{7}$$

Коэффициент преобразования мощности правополяризованного поля в левополяризованное при отражении от почвы выразится формулой

$$K_{\rm np} = \frac{\Gamma_{\rm r}^2 A_{\rm r}^2 + \Gamma_{\rm B}^2 A_{\rm B}^2}{A_{\rm r}^2 + A_{\rm B}^2}.$$
 (8)



Рис. 3. Зенитная зависимость коэффициента отражения от почвы



Рис. 4. Зенитная зависимость коэффициента преобразования правой поляризации в левую при отражении от почвы

Зенитная зависимость этой функции представлена графиками рис. 4.

Из этих графиков видно, что в диапазоне зенитных углов  $\pm 80^{\circ}$  коэффициент преобразования правополяризованных сигналов в левополяризованные для сухой почвы не превышает 0,24, а для влажной почвы — 0,33.

Рассмотрим теперь зеркальные отражения от земной (или в общем случае подстилающей) поверхности. Иллюстрация углов прихода на антенну прямого и отраженного лучей представлена на рис. 5. Расстояние от места отражения до антенны  $R = h/\cos\theta$  (где h = высота антенны над землей) возрастает с ростом угла  $\theta$ . Это приводит к небольшому ослаблению отраженного сигнала.



Рис. 5. Диаграмма отражения от земли

Из этой диаграммы видно, что взаимодействуют (интерферируют) прямой луч, падающий на антенну под углом  $\theta$ , и отраженный луч, попадающий на антенну под углом  $180^{\circ} - \theta$ . Поскольку областью прямой видимости являются углы  $\theta = 0-80^{\circ}$ , постольку область отраженных лучей находится в растворе  $\theta = 180^{\circ}-100^{\circ}$ . Будем в дальнейшем называть эти углы дополнительными.

Проанализируем свойства зарубежных антенн по подавлению сигналов левой поляризации в сравнении с требуемыми подавлениями для достижения точности  $\Delta r \leqslant 1$  мм при отражении от влажной почвы. Для этого рассмотрим диаграммы направленности, приведенные на рис. 6–8.

Данные, полученные из анализа этих диаграмм, суммированы в табл. 2. Очевидно, что все эти антенны удовлетворяют требованиям подавления сигналов левой поляризации только в диапазоне зенитных углов  $\theta = 0-40^\circ$ .

Поскольку требования для сухой почвы могут быть ослаблены на  $\sim 2$  дБ, то антенна NovAtel 702 на чок-ринге удовлетворяет требованиям подавления левой поляризации для сухой почвы в диапазоне зенитных углов 0–60°.

Таким образом, можно предположить, что в приемниках этих антенн используется дополнительная статистическая обработка результатов длительных измерений. Это подтверждается указа-

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ т. 5 вып. 3 2018

$\theta^{\circ}$		20°-160°	40°-140°	60°-120°	80°-100°
$K_{ m np}$ для влажной почвы		0,1	0,11	0,16	0,33
Требуемое подавление левой поляризации в антенне на углах		20 дБ	20 дБ	21,5 дБ	25 дБ
$180^\circ- heta$ , необходимое для $\Delta r\leqslant 1$ мм	2	22 дБ	22 дБ	23,5 дБ	27 дБ
NovAtel 702	1	34	25,7	19,3	16,4
Novater 702	2	33	25,4	23	12,6
Trimble Zephyr Geodetic 2		17,8	15,3	14,3	7,7
Timble Zephyr Geodetic 2	2	26,9	19,5	15,5	7,5
Javad		31,9	26,2	20,2	12,8
		29,5	27,6	17,5	5,4

Таблица 2. Свойства антенн по подавлению сигналов левой поляризации на дополнительных углах



Рис. 6. Зенитные ДН антенны NovAtel 702

нием в документации на то, что рекламируемые точности достигаются только при использовании соответствующих этим антеннам приемников.

# Антенна диапазона частот L1 с подавлением многолучевости

Подавление сигналов левой поляризации из нижней полусферы можно осуществить в конструкции антенны, представленной на рис. 3, комбинируя ДН левых поляризаций при  $\theta = 180^\circ$ ,



Рис. 7. Зенитные ДН антенны Trimble Zephyr Geodetic 2

представленные на рис. 2. Из этого рисунка видно, что сигналы МПА и АМВВ близки по амплитуде, а из фазовых ДН следует, что сигналы АМВВ сдвинуты по отношению к сигналу МПА на 135°. Следовательно, добавляя к фазе сигнала АМВВ 45° и комбинируя его с сигналом МПА, можно получить подавление левой поляризации.

Результирующая ДН приведена на рис. 9. Из этого рисунка видно, что сигналы левой поляризации нигде не превышают —33 дБ, что намного выше показателей рассмотренных выше импортных антенн.



Рис. 8. Зенитные ДН антенны Javad



Рис. 9. Результирующая ДН смеси сигнала МПА и повернутого по фазе на 45° сигнала АМВВ антенны на фланце диаметром 200 мм

Результаты анализа полученных результирующих ДН правой и левой поляризаций приведены в табл. 3.

Таблица 3. Подавление левой поляризации по отношению к правой на дополнительных углах, дБ (теория)

Частота, ГГц	20°-160°	40°-140°	60°-120°	80°-100°
1,575	32	38	38	26
1,595	48	51	41	38
1,615	32	37	44	41

Такая антенна была реализована в макетном исполнении: диаметр фланца — 130 мм, внешний диаметр «антиантенны» — 94 мм, внутренний диаметр «антиантенны» — 66 мм, высота «антиантенны» — 10 мм, материал «антиантенны» — фольгированный фторопласт  $\varepsilon = 2,4$ . Точки питания «антиантенны» на диаметре 70 мм. Основная антенна имеет подложку из дифлара с  $\varepsilon = 9,6$  высотой 17 мм; точки питания на диаметре 17 мм.

Фотография макета антенны приведена на рис. 10. Для питания антенны была собрана схема, приведенная на рис. 1. Каждая из антенн запитывалась с помощью квадратурной микросхемы SCQA-4-162. При этом точки питания AMBB относительно МПА были смещены на 90°, для того чтобы использовать для конечного суммирования квадратурную двухканальную микросхему QCN-19.

Для настройки «антиантенны» сначала были сняты амплитудные и фазовые ДН МПА и АМВВ на левой поляризации. Подбором высоты «антиантенны» удалось выровнять коэффициенты усиления МПА и АМВВ на левой поляризации при  $\theta$  = = 180°. Подбором длин кабелей Кб1 и Кб2 была достигнута требуемая фазировка выходов микросхем SCQA-4-162.

На рис. 12 представлены измеренные ДН настроенного макета. В табл. 4 показаны результаты по подавлению левой поляризации на дополнительных углах. Сравнивая данные табл. 4 с данными табл. 2, видим, что предложенный вариант антенны с «антиантенной» далеко превосходит зарубежные образцы по уровню подавления левой поляризации при существенно меньших габаритах.



Рис. 10. Фотография макета антенны с подавлением левой поляризации

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ т. 5 вып. 3 2018



Рис. 11. Схема питания антенны, состоящей из МПА и АМВВ

Таблица 4. Подавление левой поляризации по отношению к правой на дополнительных углах, дБ (эксперимент)

Частота, ГГц	20°-160°	40°-140°	60°-120°	80°-100°
1,575	43	35	31	25
1,611	41	43	35	25



Рис. 12. Зенитные ДН МПА с АМВВ с подавлением левой поляризации

Аналогично может быть сконструирована двухдиапазонная антенна с подавлением сигналов левой поляризации. Для этого двухэтажная антенна диапазонов частот L1 и L2 совмещается с AMBB, расположенной в нижнем этаже. Сигналы левой поляризации AMBB комбинируются с сигналами левых поляризаций основной антенны.

#### Список литературы

- 1. Татарников Д.В. Антенны высокоточного позиционирования по сигналам глобальных спутниковых навигационных систем. Дисс.... доктора технических наук. Государственный технический университет МАИ. М., 2009. 252 с.
- Патент РФ на изобретение № 2620195, «Резонансная антенна», авторы: Н. Г. Князев, И. В. Ушко, В. Е. Сагач, О. А. Курдюмов, О. Е. Лопатко, Ю. С. Яскин, приоритет от 19.02.16.
- www.gpscom.ru/catalog.aspx?id=45 (дата обращения: 09.08.2018).
- 4. www.geokraft.ru/news/2007/07/23/33/, с. 1. (дата обращения: 26.09.2018).
- 5. www. Javad.com/jgnss/products/antennas/RingAnt-G3T\_spa.html (дата обращения: 30.08.2018).
- Владимиров В.М., Марков В.В., Фатеев Ю.Л., Шепов В.Н. Щелевая полосковая антенна круговой поляризации с дополнительными спиральными щелями в излучателе // Изв. вузов. Физика, 2013, т. 56, № 8/2. С. 97-101.
- 7. *Кугушев А.М., Голубева Н.С.* Основы радиоэлектроники. М.: Энергия, 1969. 880 с.
- 8. Юрцев Ю.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. М.: Советское радио, 1974. 224 с.